干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

梭梭林土壤结皮发育对黄花补血草种子萌发和种群特征的影响

李昌龙[1,2,3]， 吴 昊[3]， 姜生秀[2,3]， 李得禄[2,3]， 王多泽[1,3]， 张立恒[3]

（1. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站，甘肃 民勤 733300；2. 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地，甘肃 武威 733000；3. 甘肃省治沙研究所，甘肃 兰州 730070）

摘 要：通过梭梭林下黄花补血草种群发育和土壤种子萌发动态的野外调查以及模拟土壤结皮、降水试验，研究了土壤结皮发育（无结皮覆盖土壤NSC、物理结皮覆盖的土壤PSC、生物结皮覆盖的土壤BSC）对其土壤种子萌发、幼苗死亡、种群特征的影响以及土壤结皮发育与模拟降水的相互作用，旨在为梭梭林下黄花补血草种群建植以及灌草结合的治沙模式提供理论依据。研究结果表明：(1) 土壤结皮的发育可以促进黄花补血草土壤种子萌发，表现为BSC>PSC>NSC，且处理间差异极显著（$P<0.01$）；而种群密度则受到限制，NSC和PSC覆盖的土壤与BSC覆盖的土壤之间差异极显著（$P<0.01$）；种群的平均株高和冠幅逐渐增大，但差异不显著（$P>0.05$）。(2) 在15 mm模拟降水条件下，土壤结皮发育对种群密度和土壤种子萌发均具有显著促进作用，具体表现为PSC>BSC>NSC，且差异极显著（$P<0.01$），对种群的平均株高和冠幅没有显著影响（$P>0.05$），而幼苗死亡率表现为NSC>BSC>PSC，且差异性极显著($P<0.01$)。(3) 随着模拟降水量的逐渐增加，3种土壤结皮覆盖的土壤种子萌发率逐渐增大，而其幼苗死亡率逐渐减小；而不同结皮间存在差异性，表现为土壤种子萌发率BSC>PSC>NSC，幼苗死亡率NSC>PSC>BSC。梭梭林下土壤结皮发育既增加了土壤表层水土环境的稳定性，又增加了黄花补血草土壤种子基数，有利于土壤种子萌发和种群的更新和发育，而模拟降水可有效改善土壤水分条件，特别是结皮层土壤水分，为黄花补血草土壤种子萌发和种群更新提供了必要的物质基础和环境条件。

关 键 词：土壤结皮；土壤种子萌发；种群特征；黄花补血草；梭梭林

文章编号：

土壤结皮是干旱荒漠地区表层土壤在降尘、降水、生物等因素共同作用的结果[1-3]。土壤结皮的发育使土壤表层的环境稳定性增加，并对结皮层以及深层土壤养分循环、降水入渗、土壤水分蒸发以及植被更新和发育产生深刻影响，为干旱荒漠地区植被发育和演替提供了稳定的环境[4-11]。干旱荒漠地区土壤结皮的发育对荒漠植物种子的扩散、定居以及土壤种子萌发、幼苗生长、种群数量特征具有显著影响，但目前土壤结皮发育对土壤种子萌发的影响存在3种观点，既对种子萌发具有促进作用，或具有抑制作用，或因植物种类而存在差异[12-16]。

甘肃省民勤治沙综合试验站建站初期，引进梭梭（*Haloxylon ammodendron*）开展繁育技术研究，并结合黏土沙障在沙区开展人工防风固沙林建设。经过长期的林分演变，梭梭人工林的结构和功能趋于稳定，并为林下土壤结皮发育提供了稳定的环境条件[17-18]，其发育过程深刻地影响着土壤种子的萌发过程和种群发育特征。在梭梭林下土壤结皮发育区域内黄花补血草（*Limonium aureum*）种群已成为林下单一的多年生优势草本种群，其防风固沙效果和植被修复效果极其明显。在以往研究中，对黄花补血草种群开展了大量的研究工作[19-21]，但对梭

收稿日期：2020-07-27； **修订日期：**2021-04-02

基金项目：国家自然科学基金项目（31660124）；甘肃省科技支撑项目（甘林规函[2019]423号）

作者简介：李昌龙（1974-），男，研究员，主要从事生物多样性与退化植被恢复研究. E-mail: lichlong1998@163.com

梭林下土壤结皮发育对黄花补血草土壤种子萌发和种群数量特征影响的研究未见报道。本文通过野外种群调查和模拟降水实验,研究土壤结皮发育对黄花补血草土壤种子萌发和种群数量特征的影响,探讨其对土壤种子萌发与种群数量特征的影响以及相互作用,为干旱荒漠地区梭梭林下地被植被建设与防沙治沙提供理论依据与实践指导。

1 研究区概况

研究区设在甘肃省民勤治沙综合试验站内(38°35′07″N,102°58′31″E,海拔1378 m),位于巴丹吉林沙漠东南缘民勤西沙窝沙井子地区,属于典型的温带大陆性荒漠气候类型。光热资源丰富,日照时间长,昼夜温差大,年平均日照时间2832.1 h,年平均气温7.6 ℃,极端低温-30.8 ℃,极端高温40.0 ℃,无霜期175 d;气候干旱少雨,年均降雨量113.2 mm,集中在7—9月,占总降水量的73%,年均蒸发量2604.3 mm,干燥度5.1,年平均空气相对湿度47%;≥10 ℃的活动积温3036.4 ℃;风大沙多,盛行西北风,全年扬沙天59 d,其中沙尘暴27 d,多集中在2—5月,年平均风速2.5 $m\cdot s^{-1}$,最大风速为23.0 $m\cdot s^{-1}$;土壤为沙壤土,pH值8.3,地下水埋深16 m以下。植被主要以旱生的沙生灌木、半灌木和草本为主。

2 研究方法

2.1 土壤结皮发育对种群发育的影响

在甘肃省民勤治沙综合试验站人工梭梭林保护区内,采用空间尺度代替时间尺度的方法,选择土壤结皮发育过程中的3种典型样地,即土壤结皮发育顺序依次为无结皮覆盖的土壤、物理结皮覆盖的土壤、生物结皮覆盖的土壤,每个样地随机设置40个2 m×2 m的样方,调查黄花补血草种群密度、高、冠幅等指标,并统计样方内土壤种子萌发数。

2.2 土壤结皮发育对土壤种子萌发的影响

设置3个2 m×8 m的试验池,池深0.6 m,每个试验池再次分割成4个小试验池(2 m×2 m,即4个重复样方),填充土壤为白刺沙包土,填充厚度0.6 m,分3次填充,每填充0.2 m土壤后踩实平整,每个试验池均匀撒播300粒种子,分别采集沙丘深层土壤(NSC)、深层黏性土壤(PSC)和生物结皮层土壤(BSC)作为无结皮覆盖、物理结皮覆盖、生物结皮覆盖的土壤结皮覆盖材料,覆盖厚度为0.5 cm,每隔20 d模拟降水一次,模拟降水量为15 mm。每隔7 d进行一次种子发芽数和幼苗死亡数的调查,研究同一模拟降水量下,土壤结皮对土壤种子萌发和种群数量特征的影响。

2.3 模拟降水条件下土壤结皮对土壤种子萌发的影响

试验池规格和试验设计与试验方法2.2相同,每隔20 d模拟降水一次,模拟降水量分别为3 mm、5 mm、10 mm、15 mm共4个水平。每隔7 d进行一次种子发芽数和幼苗死亡数的调查,研究不同模拟降水量下土壤结皮对土壤种子萌发和种群数量特征的影响。

3 结果与分析

3.1 土壤结皮发育对种群发育和更新的影响

对梭梭林下黄花补血草3种样地土壤种子萌发密度和种群发育情况进行调查(表1)发现,随着土壤结皮发育,种群密度先增加后急剧减小,且在NSC和PSC覆盖的土壤与BSC覆盖的土壤之间差异极显著(P<0.01),而NSC与PSC之间差异不显著(P>0.05);土壤种子萌发数逐渐增大,且3种结皮覆盖的土壤之间差异极其显著(P<0.01);对种群个体株高的影响不显著(P>0.05);冠幅在NSC覆盖的土壤与PSC、BSC覆盖的土壤之间差异显著(P<0.05),而

表1 梭梭林下土壤结皮发育对黄花补血草种群发育和更新的影响

Tab. 1 Effects of soil crust development on populations development and regeneration of *Limonium aureum* under *Haloxylon ammodendron* plantations

土壤结皮	种群密度/株·m^{-2}	株高/m	冠幅/m^2	土壤种子萌发数/株·m^{-2}
NSC	0.7417±0.1974A	0.1110±0.0034a	0.0290±0.0006b	0.2833±0.0685C
PSC	0.8187±0.1281A	0.1508±0.0044a	0.0452±0.0019a	3.6625±0.0848B
BSC	0.0333±0.0028B	0.1575±0.0087a	0.0484±0.0023a	6.9083±0.1541A

注:NSC、PSC、BSC分别表示沙丘深层土壤、深层黏性土壤和生物结皮层土壤。同一列不同样地之间,相同字母表示差异不显著,不同小写字母表示差异显著,不同大写字母表示差异极显著。

PSC和BSC覆盖的土壤之间没有显著差异(P>0.05)。由于丰富的土壤种子基数和较好的土壤水分条件，PSC覆盖的土壤适宜黄花补血草土壤种子萌发和种群的发育更新。而BSC覆盖的土壤虽然具有丰富的土壤种子基数，保障了较高的土壤种子萌发，但由于深层土壤水分的降水补给作用减弱，导致种群的保存率下降；而NSC覆盖的土壤表现与BSC相反，由于土壤表层水土环境的不稳定性，导致土壤种子基数降低和种子萌发数极低，但由于深层土壤水分得到有效的降水补给，使得种群保存率提高。可见自然条件下土壤结皮的发育有利于黄花补血草土壤种子的萌发，但对种群密度的限制作用逐渐增强。

在模拟降水(15 mm)前提下(表2)，土壤结皮发育对黄花补血草植株株高和冠幅没有显著的影响(P>0.05)，但对种群密度和土壤种子萌发具有显著的促进作用，具体表现为PSC>BSC>NSC，且差异极显著(P<0.01)。NSC覆盖的土壤表层环境极不稳定，导致土壤种子的流失，降低土壤种子基数低，而表层土壤水分蒸发强烈而易形成干沙层，进一步导致土壤种子萌发率极低和幼苗死亡率极高。PSC覆盖的土壤最适宜黄花补血草的土壤种子萌发和种群更新，表现在土壤种子萌发量大，种群密度也保持在较高水平，土壤表层物理结皮的形成既有利于增加土壤种子库密度，又很好地改善了土壤水分条件。而BSC覆盖的土壤相对于PSC覆盖的土壤，黄花补血草的土壤种子萌发和种群更新受到一定制约，是由于其结皮层具有较强的降水蓄积能力，减弱降水入渗作用而加速土壤表层水分的蒸发，致使深层土壤水分降低，影响土壤种子萌发，使种群发育和更新的抑制作用逐渐增强。

3.2 梭梭林下土壤结皮发育对土壤种子萌发率和幼苗死亡率的影响

在15 mm模拟降水条件下，随着土壤结皮的逐渐发育，黄花补血草土壤种子在3种结皮覆盖的土壤中萌发率表现为PSC>BSC>NSC(图1)，而幼苗死亡率表现为NSC>BSC>PSC(图2)，且差异极显著(P<0.01)。NSC覆盖的土壤既具有最低的土壤种子萌发率，又具有最高的幼苗死亡率，表明NSC覆盖的土壤其表层水土环境的不稳定性既不利于黄花补血草种子的着床和土壤种子的萌发，也不利于幼苗的成活和保存，因此土壤结皮发育初期环境条件不利于黄花补血草种子萌发和种群发育。PSC覆盖的土壤其种群的土壤种子萌发率最高，而幼苗死亡率最低，因为物理结皮的发育极大地改善了土壤种子的基数和土壤水分条件，促进了黄花补血草种群在PSC覆盖的土壤上的良好发育。相对PSC覆盖的土壤，BSC覆盖土壤的土壤种子萌发率相对较低，死亡率也相对较高，可见生物结皮的发育，在促进土壤种子库基数和土壤种子萌发率的同时，由于生物结皮的降水蓄积能力和截留能力进一步加强，使深层土壤水分补给作用减弱，加剧了深层土壤的旱化，在一定程度上加速了种群幼苗的死亡。

3.3 模拟降水条件下土壤结皮发育对土壤种子萌发率和幼苗死亡率的影响

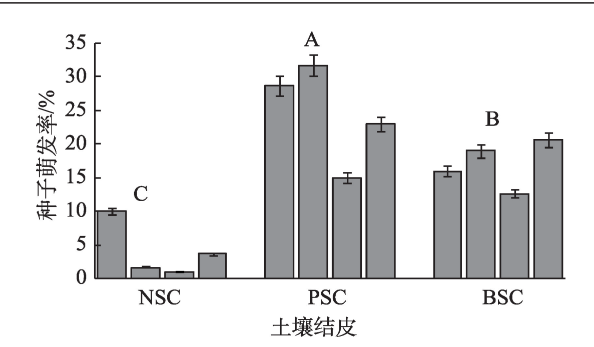
随着模拟降水量的逐渐增加，不同土壤结皮覆盖的土壤，其黄花补血草土壤种子萌发率都呈现逐渐增大的趋势(图3)，而幼苗死亡率逐渐减小(图4)。PSC覆盖的土壤随模拟降水量的逐渐增加，对黄花补血草种群发育的促进作用极其明显，其土壤种子萌发率逐渐升高和幼苗死亡率逐渐减小，且差异性极显著(P<0.01)。在NSC覆盖的土壤和BSC覆盖的土壤中，模拟降水对黄花补血草种群的促进作用相对于PSC覆盖的土壤较小，但其差异性显著(P<0.05)，其中NSC覆盖的土壤其幼苗死亡率的变化无规律可循，主要与土壤种子萌发率极低和不稳定的表层水土环境有关。而在相同模拟降水量下，随着土壤结皮的逐渐发育，黄花补血草土壤种子萌

表2 15 mm模拟降水条件下土壤结皮发育对黄花补血草种群发育和更新的影响

Tab. 2 Effects of soil crust development on populations development and regeneration of *Limonium aureum* under simulated precipitation with 15 mm

土壤结皮	种群密度/株·m^{-2}	株高/m	冠幅/m^2	土壤种子萌发数/株·m^{-2}
NSC	0.9375±0.1836C	0.1587±0.0031a	0.0349±0.0003a	5.8125±0.6523C
PSC	11.0667±1.9289A	0.1502±0.0040a	0.0353±0.0006a	90.1333±7.7333A
BSC	8.0000±2.2150B	0.1520±0.0036a	0.0422±0.0011a	33.1250±3.0156B

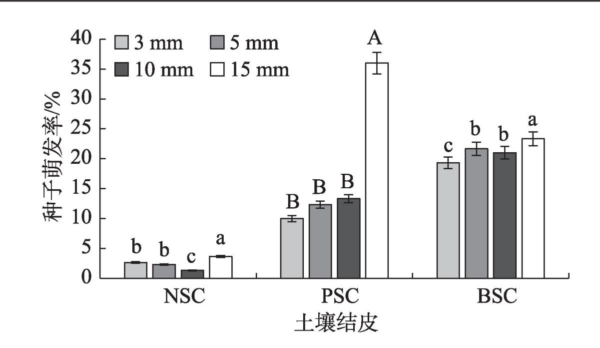
注：同一列不同样地之间，相同字母表示差异不显著，不同小写字母表示差异显著，不同大写字母表示差异极显著。



注：不同大写字母表示不同土壤结皮处理之间差异极显著。

图1　土壤结皮发育对土壤种子萌发率的影响

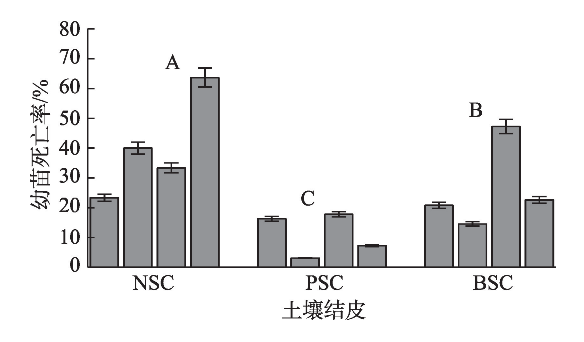
Fig. 1　Effect of soil crust development on soil seed germination rate of *Limonium aureum*



注：不同小写字母表示不同降水处理之间差异显著，不同大写字母表示不同降水处理之间差异极显著。下同。

图3　模拟降水下土壤结皮对土壤种子萌发率的影响

Fig. 3　Effect of soil crust on soil seed germination rate of *Limonium aureum* under simulated precipitation



注：不同大写字母表示不同土壤结皮处理之间差异极显著。

图2　土壤结皮发育对幼苗死亡率的影响

Fig. 2　Effect of soil crust development on seedling mortality rate of *Limonium aureum*

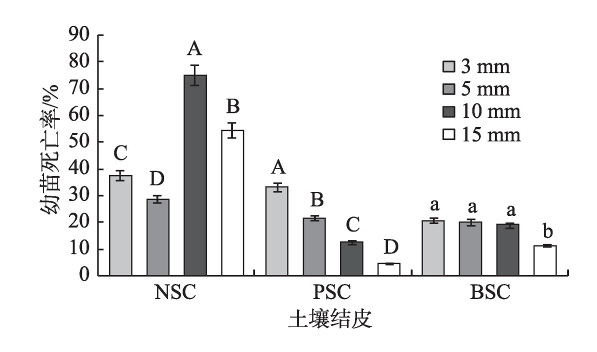


图4　模拟降水下土壤结皮对幼苗死亡率的影响

Fig. 4　Effect of soil crust on seedling mortality of *Limonium aureum* under simulated precipitation

发率逐渐增加，而幼苗死亡率逐渐减小，且差异极显著（$P<0.01$）；但不同结皮间存在差异，土壤种子萌发率表现为BSC>PSC>NSC，而在15 mm模拟降水条件下PSC土壤种子萌发率远大于BSC和NSC处理，说明PSC覆盖的土壤15 mm模拟降水对黄花补血草土壤种子萌发具有极其显著的作用，幼苗死亡率表现为NSC>PSC>BSC，而在15 mm模拟降水条件下PSC幼苗死亡率小于BSC和NSC处理。

4　讨　论

在干旱荒漠地区，降水入渗和深层土壤水分循环对荒漠植物种群的发育和更新起到关键性的作用[22-23]，而土壤结皮发育对降水沙地入渗和深层土壤水分循环有着显著的影响[8,24]，因此土壤结皮发育对荒漠植物种群的发育和更新，特别是对土壤种子的萌发、幼苗的生长和种群特征起到决定性的作用[25-27]。本文研究表明在梭梭林下土壤结皮的逐渐发育显著提高了黄花补血草土壤种子的萌发率，但对幼苗的成活率和种群的后期发育的抑制作用逐渐增强。而在模拟降水条件下，土壤结皮发育既能促进土壤种子萌发，又能促进种群密度，PSC覆盖的土壤能有效促进土壤种子的萌发，幼苗保存率较高，BSC覆盖的土壤次之，NSC覆盖的土壤最差。土壤种子库是土壤种子萌发的物质基础，而降水是土壤种子萌发的基本条件[26,28-29]，梭梭林下土壤结皮的发育对土壤种子基数和结皮层土壤水分有很大的改善作用，进而促进了黄花补血草种子的扩散、定居、萌发和种群更新[30]。

土壤结皮发育对黄花补血草土壤种子萌发与幼苗死亡同样具有显著的影响，15 mm模拟降水条件下，土壤种子萌发率表现为PSC>BSC>NSC，而幼苗死亡率表现为NSC>BSC>PSC，而且差异极显著（$P<0.01$）。NSC覆盖的土壤其地表结构的极度不稳

定性，极易导致土壤种子基数的减小和表层土壤水分的流失，进一步导致土壤种子萌发率极低，而幼苗死亡率极高。而土壤结皮的发育显著增加了土壤种子基数和表层土壤的持水力[30-31]，所以PSC覆盖的土壤提高了黄花补血草土壤种子的萌发率，而降低了幼苗的死亡率，而BSC覆盖的土壤次之。但有关学者研究表明土壤结皮发育会降低土壤种子库密度，也会抑制浅层土壤草本植物种类的种子萌发[32-33]，与本文论点相反，主要与土壤结皮发育阶段、降水条件的区域性差异和土壤种子存在形式有关，如具种毛、具翅、花萼宿存等[34]，增加种子的流动性而不易进入土壤种子库。

土壤结皮的发育有效提高结皮层土壤含水率和土壤持水力，土壤结皮层土壤含水率逐渐增大，生物结皮层最高可达8%，而无结皮土壤表层小于4%，物理结皮层大于4%，短期内有利于黄花补血草土壤种子萌发[35-36]。随着模拟降水量的逐渐增加，不同土壤结皮覆盖的土壤其土壤种子萌发率逐渐增大，而其幼苗死亡率逐渐减小[37-38]。PSC覆盖的土壤随着模拟降水量的增加，其对黄花补血草土壤种子萌发率和幼苗死亡率的具有积极的影响，其差异极显著（$P<0.01$），因为PSC覆盖的土壤即具有丰富的土壤种子库基数，又具有良好的土壤种子萌发的土壤水分条件。而NSC覆盖的土壤，由于不稳定的表层水土环境，造成土壤种子的严重流失和土壤水分的流失，降低了土壤种子库基数，导致土壤种子萌发率极低，幼苗死亡率极高。而BSC覆盖的土壤，具有稳定的土壤种子基数和土壤表层环境，模拟降水补给有利于提高土壤种子萌发率，减小幼苗死亡率，随模拟降水量的增加，其变化过程比较平缓，但其差异性较显著（$P<0.05$）。

5 结 论

综上所述，梭梭林下土壤结皮发育既增加了土壤表层水土环境的稳定性，又增加了黄花补血草土壤种子基数，促进了土壤种子萌发和种群的更新与发育，而模拟降水可有效改善土壤水分条件，特别是结皮层土壤水分，为黄花补血草土壤种子萌发和种群更新提供了必要的物质基础和环境条件。所以梭梭林下土壤结皮发育对黄花补血草土壤种子萌发和种群更新具有积极的促进作用，该结论对梭梭林下黄花补血草地被植被建植技术的推广应用具有一定的实践指导意义。

参考文献（References）

[1] 韩炳宏, 牛得草, 贺磊, 等. 生物土壤结皮发育及其影响因素研究进展[J]. 草业科学, 2017, 34(9): 1793-1801. [Han Binghong, Niu Decao, He Lei, et al. A review on the development and effect of biological soil crusts[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(9): 1793-1801.]

[2] 李新凯. 毛乌素沙地生物结皮的空间分布及多种生态功能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. [Li Xinkai. Spatial distribution and various ecological functions of biological crusts in Mu Us Sandy[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.]

[3] Wu L, Zhang Y M. Precipitation and soil particle size co-determine spatial distribution of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(5): 701-711.

[4] 杨东东, 赵伟, 陈林, 等. 人工柠条林生物土壤结皮地表水文效应的季节转换[J]. 西北植物学报, 2018, 38(7): 1349-1356. [Yang Dongdong, Zhao Wei, Chen Lin, et al. Seasonal conversion of effects of biological soil crusts on surface hydrology in the artificial *Caragana intermedia* shrub lands[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(7): 1349-1356.]

[5] 董金伟, 李宜坪, 李新凯, 等. 毛乌素沙地植被类型对生物结皮及其下伏土壤养分的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 112-117. [Dong Jinwei, Li Yiping, Li Xinkai, et al. Effects of vegetation types on biological crusts and soil nutrients in Mu Us Sandy[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 112-117.]

[6] Hu R, Wang X P, Pan Y X, et al. Seasonal variation of net N mineralization under different biological soil crusts in Tengger Desert, north China[J]. Catena, 2015, 127: 9-16.

[7] 李昌龙, 姜生秀, 吴昊, 等. 梭梭林下土壤结皮发育对降水入渗动态的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 35-40. [Li Changlong, Jiang Shengxiu, WU Hao, et al. Effects of soil crust development on precipitation infiltration dynamics under *Haloxylon ammodendron* plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 35-40.]

[8] 石薇, 王新平, 张亚峰. 腾格里沙漠人工固沙植被区浅层土壤水分对降水和生物结皮的响应[J]. 中国沙漠, 2018, 38(4): 600-609. [Shi Wei, Wang Xinping, Zhang Yafeng. Response of shallow soil moisture to precipitation and biological crust in artificial and-fixing vegetation area of Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(4): 600-609.]

[9] Flavia-Alejra F, Alejro L, Guadalupe P. Effects of biological soil crusts and drought on emergence and survival of a Patagonian perennial grass in the Monte of Argentina[J]. Journal of Arid Land,

2014, 6(6): 735−741.

[10] 张元明, 王雪芹. 荒漠地表生物土壤结皮形成与演替特征概述[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4484−4492. [Zhang Yuanming, Wang Xueqin. Summary on formation and developmental characteristics of biological soil crusts in desert areas[J]. Acta Ecological Sinica, 2010, 30(16): 4484−4492.]

[11] 麻云霞, 王月林, 李钢铁, 等. 生物地毯治沙工程—生物结皮现状的研究进展[J]. 草地学报, 2019, 27(3): 531−538. [Ma Yunxia, Wang Yuelin, Li Gangtie, et al. Biological carpet sand control project research progress of biological crusts[J]. Acta Agrestia Sinaca, 2019, 27(3): 531−538.]

[12] 戴黎聪, 柯浔, 曹莹芳, 等. 关于生态功能与管理的生物土壤结皮研究[J]. 草地学报, 2018, 26(1): 22−29. [Dai Licong, Ke Xun, Cao Yingfang, et al. Study on biological soil crust for ecological function and management[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(1): 22−29.]

[13] Rudiger P, Reinhard B. Effect of microbiotic soil surface crusts on emergence of vascular plants[J]. Plant Ecology, 2000, 150: 65−75.

[14] Li X R, Jia X H, Long L Q, et al. Effects of biological soil crusts on seed bank, germination and establishment of two annual plant species in the Tengger Desert (N China)[J]. Plant and Soil, 2005, 277: 375−385.

[15] Riveraa-Aguilar V, Godinez-Alvarez H, Manuell-Cacheux I, et al. Physical effect of biological soil crusts on seed germination of two desert plants under laboratory conditions[J]. Journal of Arid Environment, 2005, 63: 344−352.

[16] 庄伟伟, 张元明. 生物结皮对荒漠草本植物群落结构的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1338−1344. [Zhuang Weiwei, Zhang Yuanming. Effects of soil micro biotic crust on plant community in the Gurbantunggut Desert[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1388−1344.]

[17] 王新友, 马全林, 靳虎甲, 等. 石羊河下游人工梭梭林土壤呼吸变化特征及其与水热因子的关系[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 570−580. [Wang Xinyou, Ma Quanlin, Jin Hujia, et al. Soil respiration variation characteristics and its relationship with hydrothermal factors of artificial *Haloxylon ammodendron* forest at lower reaches of Shiyang River[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 570−580.]

[18] 付贵全, 徐先英, 徐梦莎, 等. 民勤绿洲边缘两种生境红砂种群空间格局及关联性分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 112−121. [Fu Guiquan, Xu Xianying, Xu Mengsha, et al. Spatial point pattern and relevancy of *Reaumuria soongorica* population under the two habitats in Minqin oasis fringe[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(1): 112−121.]

[19] 尤佳, 王文瑞, 卢金, 等. 盐胁迫对盐生植物黄花补血草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3825−3833. [You Jia, Wang Wenrui, Lu Jin, et al. Effects of salinity on seed germination and seedling growth in halophyte *Limonium aureum* L. Hill[J]. Acta Ecological Sinica, 2012, 32(12): 3825−3833.]

[20] 李昌龙, 李得禄, 郭树江, 等. 黄花补血草个体差异对生殖分配的影响[J]. 北方园艺, 2015, 39(6): 139−143. [Li Changlong, Li Delu, Guo Shujiang, et al. Effects of individual differences on reproductive distribution of *Limonium aureum*[J]. Northern Horticulture, 2015, 39(6): 139−143.

[21] 李昌龙, 姜生秀, 吴昊, 等. 梭梭林下土壤结皮发育对黄花补血草种群发育格局的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(3): 519−523. [Li Changlong, Jiang Shengxiu, Wu Hao, et al. Effects of soil crust development on populations development pattern of *Limonium aureum* under *Haloxylon ammodendron* plantations[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(3): 519−523.]

[22] 王夏楠. 植物群落对土壤水分变化的响应机理研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2015. [Wang Xianan. Response mechanism of plant communities to soil moisture changes[D]. Aral: Tarim University, 2015.]

[23] 王泽锋, 胡顺军, 李浩. 古尔班通古特沙漠南缘丘间地梭梭群落蒸散特征[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1303−1309. [Wang Zefeng, Hu Shunjun, Li Hao. Evapotranspiration characteristics of *Haloxylon ammodendron* community in the inter dune area on the southern margin of Gurbantunggut Desert[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1303−1309.]

[24] 李昌龙, 姜生秀, 吴昊, 等. 梭梭林下土壤结皮发育对降水入渗动态的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 35−40. [Li Changlong, Jiang Shengxiu, Wu Hao, et al. Effects of soil crust development on precipitation infiltration dynamics under *Haloxylon ammodendron* plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 35−40.]

[25] 牛纪苹. 典型荒漠植物生长对沙漠表层人工固结层的响应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. [Niu Jiping. Response of typical desert plants to artificial consolidation layer on desert surface[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.]

[26] 宋光, 李新荣, 回嵘, 等. 沙区生物土壤结皮对外来植物种子萌发的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 521−525. [Song Guang, Li Xinrong, Hui Rong, et al. Effects of biological soil crusts on seed germination of exotic plants in sandy areas [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2017, 53(4): 521−525.]

[27] 张芝萍, 李昌龙, 李得禄, 等. 不同立地条件下黄花补血草种群生长、繁殖与土壤水分的差异[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 268−270. [Zhang Zhiping, Li Changlong, Li Delu, et al. Differences of population growth, reproduction of *Limonium aureum* and soil moisture under different site condition[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(4): 268−270.]

[28] Wang Y L, Li X R, Zhao J C, et al. Population dynamics of *Echinops gmelinii* Turcz. at different successional stages of biological

soil crusts in a temperate desert in China[J]. Plant Biology, 2019, 21(6): 1140-1149.

[29] 马全林, 王继和, 朱淑娟. 降水, 土壤水分和结皮对人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5057-5067. [Ma Quanlin, Wang Jihe, Zhu Shujuan. Effects of precipitation, soil water content and soil crust on artificial *Haloxylon ammmodendron* forest[J]. Acta Ecological Sinica, 2007, 27(12): 5057-5067.]

[30] 陈孟晨, 张景光, 冯丽, 等. 沙坡头地区生物结皮覆盖区土壤种子库组成及垂直分布特征[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7614-7623. [Chen Mengchen, Zhang Jingguang, Feng Li, et al. The composition and vertical distribution characteristics of soil seed banks in soil coverage with biocrusts in the Shapotou region[J]. Acta Ecological Sinica, 2017, 37(22): 7614-7623.]

[31] 邢旭明, 马晓东, 张元明. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮对土壤种子库多样性与分布特征的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 612-620. [Xing Xuming, Ma Xiaodong, Zhang Yuanming. Effects of biological soil crusts on soil seed bank diversity and distribution characteristics in Gurbantunggut Desert[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(3): 612-620.]

[32] 苏延桂, 李新荣, 陈应武, 等. 生物土壤结皮对荒漠土壤种子库和种子萌发的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 938-946. [Su Yangui, Li Xinrong, Chen Yingwu, et al. Effects of biological soil crusts on soil seed bank and seed germination of desert plants in north China[J]. Acta Ecological Sinica, 2007, 27(3): 938-946.]

[33] 陈孟晨, 张景光, 刘立超, 等. 生物土壤结皮对一年生植物影响研究进展[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3): 483-490. [Chen Mengchen, Zhang Jingguang, Liu Lichao, et al. Advances and prospects for the effects of biological soil crusts on annual plants[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(3): 483-490.]

[34] 王蕊, 朱清科, 赵磊磊, 等. 黄土高原土壤生物结皮对植物种子出苗和生长的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 800-807. [Wang Rui, Zhu Qingke, Zhao Leilei, et al. Effects of soil biological crust on the emergence and growth of plant seeds in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(5): 800-807.]

[35] 周志彬. 生物土壤结皮对旱雀麦种子萌发和植株生长的影响[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院新疆生态与地理研究所, 2013. [Zhou Zhibin. Effects of biological soil crusts on seed germination and growth of *Bromus tectorum*[D]. Urumqi: Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, 2013.]

[36] 何明珠, 李新荣, 张景光, 等. 土壤生物结皮蒸散特征研究[J]. 中国沙漠, 2006, 27(2): 159-164. [He Mingzhu, Li Xinrong, Zhang Jingguang, et al. Evapotranspiration characteristics of soil microbiotic crusts[J]. Journal of Desert Research, 2006, 27(2): 159-164.]

[37] 单立山, 李毅, 段桂芳, 等. 模拟降雨变化对两种荒漠植物幼苗生长及生物量分配的影响[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1267-1274. [Shan Lishan, Li Yi, Duan Guifang, et al. Effects of simulate drain fall changes on seedling growth and biomass allocation of two desert plants[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1267-1274.]

[38] Shan L S, Zhao W Z, Li Y, et al. Precipitation amount and frequency affect seedling emergence and growth of *Reaumuria soongarica* in northwestern China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(4): 574-587.

Effects of soil crust development on seed germination and population characteristics of *Limonium aureum* under *Haloxylon ammodendron* plantations

LI Changlong[1,2,3], WU Hao[3], JIANG Shengxiu[2,3], LI Delu[2,3],
WANG Duoze[1,3], ZHANG Liheng[3]

(1. Gansu Minqin National Field Observation and Research Station on Ecosystem of Desertification Rangeland, Minqin 733300, Gansu, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Wuwei 733000, Gansu, China; 3. Gansu Desert Control and Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This study provides a theoretical basis for population establishment and desert control models combining shrubs and herbs by studying the effects of soil crust development and simulated precipitation on soil seed germination, seedling mortality, and plant population characteristics and interactions at Minqin County, Gansu Province, China. The plant populations analyzed included *Limonium aureum* and *Haloxylon ammodendron*, and the soil crust types evaluated included sandy soil without a soil crust (NSC), sandy soil with a physical crust (PSC), and sandy soil with a biological crust (BSC). The following results were obtained. (1) Soil crust development promoted the soil seed germination of *L. aureum* among the different soil crust types in the order of BSC>PSC>NSC. Differences among groups were extremely significant ($P<0.01$). When the population density was limited, the difference in soil seed germination between soils covered by NSC and PSC and that covered by BSC was extremely significant ($P<0.01$). The average height and crown width of the *L. aureum* population gradually increased but the difference between groups was not significant ($P>0.05$). (2) Under the condition of 15 mm of simulated precipitation, soil crust development revealed extremely significant effects on population density and soil seed germination in the order of PSC>BSC>NSC ($P<0.01$). However, no significant effect on the average height and crown width was observed ($P>0.05$). The mortality rate of seedlings showed the order NSC>BSC>PSC, and differences among the three soils were extremely significant ($P<0.01$). (3) Increases in simulated precipitation gradually increased the germination rate of soil seeds and gradually decreased the mortality rate of seedlings. The soil seed germination rate showed the order BSC>PSC>NSC, while the seedling mortality rate showed the order NSC>PSC>BSC. Taking the results together, the development of the soil crust under *H. ammodendron* plantations could not only enhance the stability of the water and soil environment on the soil surface but also increase the amount of soil seeds of *L. aureum*, which is beneficial to soil seed germination and population regeneration and development. In addition, simulated precipitation could effectively improve soil moisture conditions, especially in the soil crust layer, to provide the necessary material basis and environmental conditions for the soil seed germination and population regeneration of *L. aureum*.

Key words: soil crusts; seeds germination; population characteristics; *Limonium aurenu*; *Haloxylon ammodendron* plantations